

# Energiegewinnung ohne Radioaktivität

## Untersuchungen auf dem Gebiet der Kernfusion mit nachfolgender Kernspaltung

Lochte-Holtgreven, Walter

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 38, 1986,  
S.159-167



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

## Energiegewinnung ohne Radioaktivität

### Untersuchungen auf dem Gebiet der Kernfusion mit nachfolgender Kernspaltung

Von **Walter Lochte-Holtgreven**, Kiel

(Eingegangen am 9.10.1986)

#### Zusammenfassung:

Unter gewissen Bedingungen treten Kernreaktionen im Plasma „explodierender“ (Li + LiD)-Drähte auf. Diese Kernreaktionen sind nicht thermonuklearen Ursprungs, sondern erfolgen als Hybrid-Reaktionen, worunter eine Reaktion gemischten Charakters verstanden wird, die teilweise auf Temperaturerhöhung und teilweise auf elektrischen Feldern beruht. Ein (Li + LiD)-Plasma wird durch eine stoßweise einsetzende elektrische Entladung erzeugt und auf etwa 100 eV aufgeheizt. In der nach der Aufheizung folgenden turbulenten Ausbreitung des Plasmas gerät dieses in von der Explosion herrührende, induktive elektrische Felder. Diese bewirken die Fusion von Li und D zu dem instabilen  ${}^8\text{Be}$ , das anschließend unter Energieabgabe von 15 MeV zerfällt. Diese Energie kann außerhalb des Plasmas nutzbar gemacht werden. Die Kernreaktionen dauern während mehrerer Entladungszyklen an. Das Ziel einer Energiegewinnung ohne Einsatz von radioaktiven Stoffen und ohne radioaktiven Abfall erscheint auf die angegebene Weise erreichbar. Außerdem wird ersichtlich, warum die elektrischen Drahtexplosionen bisher ohne praktischen Erfolg geblieben sind.

Energiegewinnung auf atomarer Basis ist auf zweierlei Weise möglich: Einmal, indem man Atome vom Ende des periodischen Systems der Elemente aufspaltet und zum andern, indem man Atome vom Anfang des periodischen Systems zur Vereinigung bringt.

Otto Hahn und Mitarbeiter hatten in den dreißiger Jahren systematisch das Element Uran mit Neutronen beschossen, um neue Elemente, die Transurane, zu finden. Dabei entdeckten sie, daß  ${}^{235}_{92}\text{U}$  bei Neutronenbeschuß in zwei große Bruchstücke und mindestens zwei Neutronen zerplatzt, wobei die Neutronen neue Urankerne spalten können. Die so entdeckte Kettenreaktion führt „prompt kritisch“ zur Bombe, „kontrolliert“ zur Energiegewinnung im Reaktor. Leider führt diese Art der Energiegewinnung zu radioaktiven Spaltprodukten, deren Beseitigung besondere Maßnahmen erfordert.

Die Kernfusion andererseits wird heute durch Vereinigung von Deuterium- und Tritium-Kernen erstrebt. Leider benötigt man dazu Temperaturen von etwa  $10^9$  K. Bisher haben die damit verbundenen technischen Schwierigkeiten eine positive Energiebilanz verhindert.

Als Alternative zu den thermonuklearen Fusionsmaschinen wurde in den sechziger Jahren die Methode der „explodierenden Drähte“ untersucht. Bei diesen Versuchen

beabsichtigte man stets die thermonukleare Reaktion (D,D) zu erreichen. Die Versuche gingen auf einen Artikel von Anderson [1] (1920) zurück. Er hatte vorgeschlagen, möglichst schnell möglichst viel Energie in möglichst wenig Materie zu bringen. So sollte man nach Anderson beliebig hohe Temperaturen erreichen. Man entlud also aufgeladene Kapazitäten über sehr dünne Drähte. Aber die erwartete hohe Temperatur blieb aus, denn bei derartigen Entladungen entwickeln sich hinderliche Instabilitäten (zu Beginn vom Typ  $m = 0$ , später vom Typ  $m = 1$ ). Um diese zu vermeiden, wurden sehr schnelle Entladungen vorgeschlagen. Unter Verwendung des „Plasma-Trägheitseinschlusses“ oder auch des „Einschlusses durch das magnetische Eigenfeld“ versuchte man in den sechziger Jahren [2] mit möglichst niederinduktiven und daher sehr schnellen Entladungskreisen große Kondensatorbatterien über sehr dünne Drähte kurzzuschließen. Man erreichte Stromanstiegszeiten von  $10^6$  Amp/ $\mu$ sec und mehr. Diese Versuche erstrebten alle thermonukleare (D,D)-Reaktionen. Nach Kenntnis des Autors wurde die höchste je erreichte Neutronenausbeute von Stephanakis [3] und Mitarbeitern bei der Explosion deuterierter Nylonfäden erreicht: Es waren  $10^{10}$  Neutronen bei Anlegung von Kondensatoren, die auf  $10^6$  Volt aufgeladen waren.

Jedoch nur etwa die Hälfte aller (D,D)-Reaktionen führt zu Tritium und H, die andere Hälfte zu  $^3\text{He}$  und Neutronen. Beide Reaktionen liefern nur wenig Energie, 4 bzw. 3,3 MeV. Die erstrebte größere Energieausbeute, nämlich 18 MeV liefert erst ein zweiter Stoß von Deuterium mit entweder  $^3\text{T}$  oder  $^3\text{He}$ . Ganz offensichtlich finden derartige Stöße mit den Zwischen-Produkten bei den explodierenden Drähten aber nur selten statt. Wegen dieser benötigten Zwischenstufe bilden die explodierenden Drähte keine echte Alternative zu den (D,T)-Reaktionen. Selbst die gemessene Anzahl von  $10^{10}$  Neutronen verspricht so noch keinen großen Energiegewinn. Nachdem dieser Zusammenhang allmählich deutlich wurde, hat man die Methode der explodierenden Drähte im Hinblick auf Energiegewinnung als hoffnungslos aufgegeben. Für eine echte Alternative zur (D,T)-Reaktion müßte ein Prozeß gefunden werden, der in einem einzigen Stoß größere Energiemengen liefert.

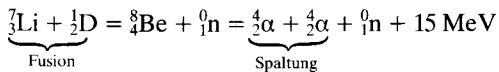
In diesem Zusammenhang erinnern wir uns an das klassische Experiment von Cockroft und Walton (1932), das damals als die „erste künstliche Atomzertrümmerung“ Aufsehen erregte. Es handelte sich um die Beschießung von  $^7\text{Li}$  mit Protonen, die zu dem instabilen Element  $^8\text{Be}$  führte, das alsbald in zwei  $\alpha$ -Teilchen zerplatzte. Die Energie dieses **einen** Stoßprozesses liefert eine Energie von 15 MeV und ist daher durchaus vergleichbar mit der Energie eines (D,T)-Fusionsprozesses, der 17,6 MeV liefert. Diese Energie steht als kinetische Energie der bei der Spaltung ausgeschleuderten  $\alpha$ -Teilchen zur Verfügung. \*)

Leider sind die  $\alpha$ -Teilchen nicht geeignet, um Folgeprozesse, etwa in der Art der Kettenreaktionen radioaktiver Elemente, auszulösen. Nichtsdestoweniger führen sie aber hohe Energie mit sich. Im Folgenden soll gezeigt werden, daß die Cockroft und

\*) Sollten durch irgendeinen Unfall im Reaktor die  $\alpha$ -Teilchen in die umgebende Atmosphäre gelangen, so würden diese den natürlichen He-Gehalt der Luft nur geringfügig erhöhen, also keine merkbare Veränderung der Umwelt hervorrufen. Ein Unfall wäre „umweltfreundlich“.

Walton Stoßprozesse auch in den Plasmen explodierender Drähte auftreten und daß man die Energie der  $\alpha$ -Teilchen leicht aus der Explosion auskoppeln und anderweitig nutzbar machen kann.

Um die Cockroft und Walton Stoßprozesse in explodierenden Drähten ablaufen zu lassen, müssen Drähte hergestellt werden, die aus einer Mischung von Li mit LiH oder LiD bestehen. Die Mischung ist deshalb notwendig, weil sowohl LiH wie auch LiD ausgezeichnet isolieren, so daß man leider aus reinem LiH oder LiD keine leitenden Drähte herstellen kann. Lange Zeit in Anspruch nehmende Versuche, eine gegenseitige Lösung von Li und LiD herzustellen, brachten keine Resultate. So blieb nur übrig, Li mit LiH oder LiD im Mörser zu einer insgesamt noch leitenden Mischung unter reinstem Argon zusammenzustampfen. Diese Mischung wurde in einer Li-Presse zu 1,3 mm dicken und 60 mm langen Drahtstücken gepreßt, letztere in 2 mm weite Glasröhrchen geschoben und an beiden Enden mit Eisenstöpseln verschlossen. Diese wurden mit Torr-seal eingekittet und dienten nachfolgend als Elektroden. Die Röhrchen wurden in einer langsamen kapazitiven Entladung zur Explosion gebracht (100 kV, 20 kJoule, 60 kHz). Um Neutronen zu erhalten, wurde nicht Li + LiH, sondern Li + LiD verwendet. Die Kernreaktion verläuft dann entsprechend der Gleichung:



In diesem Falle wird also die Energie zwischen drei Zerfallsprodukten aufgeteilt. Die beiden  $\alpha$ -Teilchen haben nur je 2,5 MeV Energie, das Neutron 10 MeV [6]. Die schnell-

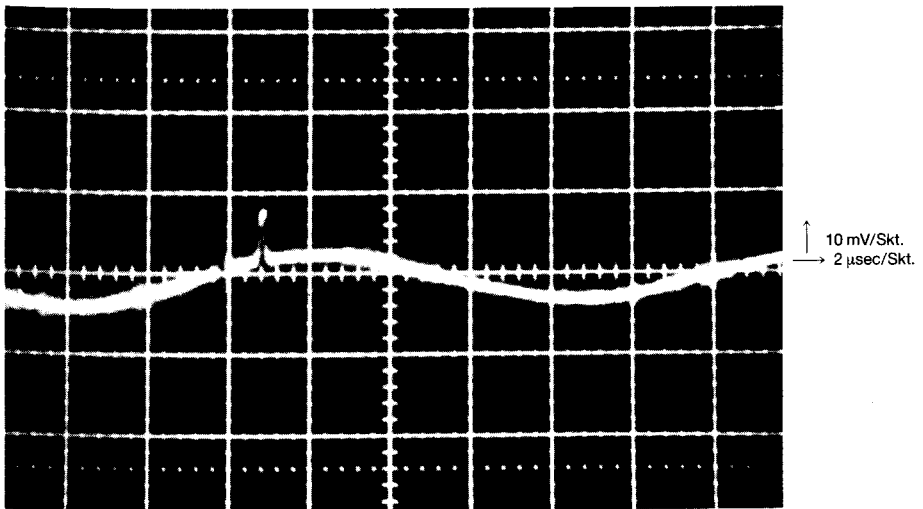


Fig. 1:

*Registrierung des Neutronenzählers bei Explosion eines reinen Li-Drahtes. Der Ausschlag nach oben ist die allen Aufnahmen gemeinsame Zeitmarke. (Störungen treten bei homogenem Drahtmaterial nicht auf.)*

len Neutronen wurden mit einem großen scintillierenden Plastikblock der Firma Nuclear Enterprise Typ NE 102 A und angeflanschem Photomultiplier registriert. Die Zeitauflösung des scintillierenden Protonen-Rückstoßzählers mit Photomultiplier und Oscillograph betrug 8 nsec. Eine Zeitmarke von einem Zeitgeber wurde mit Ausschlag nach oben angebracht, während alle Photomultiplier-Impulse so geschaltet waren, daß der Ausschlag nach unten erfolgte. Die Explosion eines reinen Li-Drahtes ist in Fig. 1 wiedergegeben.

Die geringe Welligkeit der registrierten Photomultiplierkurve wurde von dem extrem starken Magnetfeld der Entladung hervorgerufen und zwar trotz doppelter Abschirmung der Kabel vom Multiplier zur Meßkabine. Die Welligkeit hatte den Vorteil, daß es sofort möglich war, Strommaximum, Stromminimum oder die jeweilige Phase zu erkennen. Der Einfachheit halber wurde der Stromanstieg zur Auslösung des Photomultipliersignals verwendet. Dies gab eine zeitliche Verzögerung der Aufzeichnung gegenüber dem Beginn der Entladung von 1  $\mu$ sec. Das heißt aber, daß gerade in der Zeit, in der man früher gemessen hatte (solange der Draht noch nicht deformiert war), nicht gemessen werden konnte. Nun aber zeigte sich, daß nach dem Platzen des umgebenden Glasrohres und für sehr lange Zeit viele Neutronen beobachtet wurden. Die Neutronen wurden über mehrere Zyklen der Entladung beobachtet. \*)

Während dieser langen Zeit expandierte die „explodierende“ Entladungswolke. Dies bedeutet aber, daß eine adiabatische Abkühlung erfolgte, so daß die Temperatur ständig abnahm und mit Sicherheit unter der Fusionstemperatur lag. Man bemerkt aber auf der Registrierungskurve der Figur 2 nicht nur die allein nach unten gehenden nadelscharfen Ausschläge der Neutronen, sondern – sehr ins Auge springend – viele völlig symmetrisch zur Nulllinie verlaufende sehr breite Signale, die mit Sicherheit nicht vom Photomultiplier aufgezeichnete Signale sein können, denn diese würden nach unten, asymmetrisch zur Nulllinie verlaufen. Es kann auch kein Überspringen der starken über drei Skalenteile reichenden Neutronenausschläge in Frage kommen, dafür sind die Neutronenausschläge viel zu schmal. Es handelt sich um Störungen, die von kleinen Funken im Plasma der Entladung herrühren. Diese Funken sind – im Gegensatz zur Hauptentladung – sehr kurzzeitig, sie liegen im MHz-Bereich und können, wie bekannt, durch die feinsten Risse in der doppelt abgeschirmten Oszillographenleitung in die Aufzeichnung einstreuen. Die Störung und die Neutronen zeigen sich simultan, d.h. aber, daß die Kernfusion mit elektrischen Feldern gekoppelt ist, die auf die gerade erst entstandenen Ionen einwirken. Damit ist ein erster Beweis dafür erbracht, daß wir es nicht mit thermonuklearer Fusion zu tun haben. Es werden noch zwei weitere Beweise folgen.

---

\*) Vielleicht ist es notwendig, darauf hinzuweisen, daß mit den gleichen Scintillatoren auch die Höhenstrahlung aufgenommen werden kann. Dazu bedarf es jedoch völlig anderer Einstellung der Oszillographen. Umgekehrt kann man die Höhenstrahlung benutzen, um die Funktionsfähigkeit der Registrierung zu kontrollieren, wonach auf die hier benötigte Einstellung umgeschaltet wird. Bei der Höhenstrahlung hat man eine gerade Nulllinie, hier die von der Entladung eingestreute wellige Nulllinie.

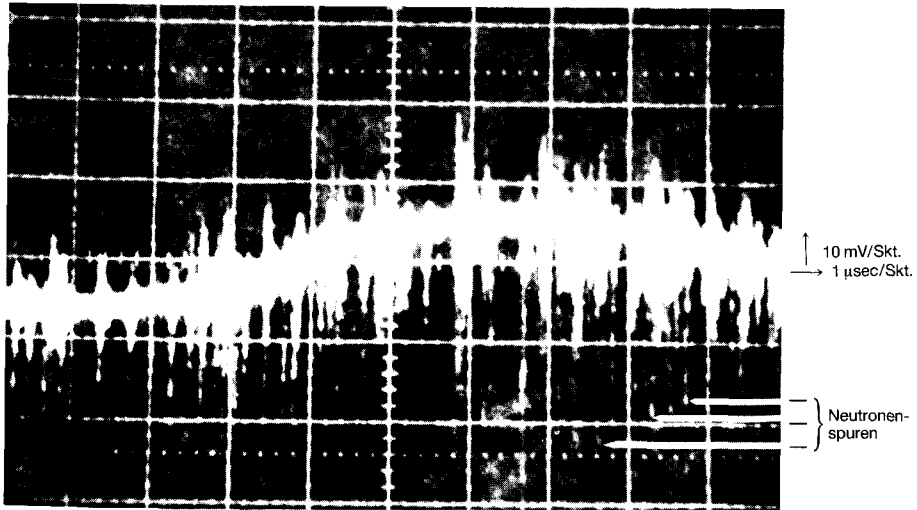


Fig. 2:

Wie Fig. 1, jedoch Li+LiD-Draht. Neutronenspuren zeigen sich als sehr kurzzeitige Impulse über mehrere Skalenteile nach unten. Gleichzeitig symmetrisch zur Nulllinie eingestreute Störungen sehr hoher Frequenz (Mhz). Neutronenspuren immer gleichzeitig mit den Störungen, aber auch Störungen ohne Neutronen, d. h. die Neutronen werden nicht immer in Richtung des Zählers ausgesandt.

Verweilen wir zunächst bei Betrachtung der Figur 2. Man bemerkt, daß die Störungen und damit auch die elektrischen Felder auch dann auftreten, wenn der Strom der Hauptentladung durch Null geht. Dies wird verständlich, wenn man sich daran erinnert, daß die Entladung, wie schon angedeutet, Instabilitäten durchläuft ( $m = 0$  anfangs,  $m = 1$  in der späteren, jetzt beobachteten Phase). Die Instabilitäten verursachen ständig wechselnde induktive elektrische Felder, zumal das Material des explodierenden Drahtes nicht homogen war, sondern aus einer Mischung von elektrisch leitendem Material (Li) und nicht leitendem Material (LiD) bestand. Außerdem sind Strom und Spannung während der Entladung nicht in Phase. Einige Störungen zeigen sich ohne Neutronen, d. h. daß in diesen Fällen die Neutronen nicht von den Zählern aufgefangen wurden.

Ein zweites Argument für die nicht rein thermische Fusion bildet wieder die Betrachtung der Energieverteilung: Der gepreßte (Li+LiD)-Draht hatte ein Volumen von  $0,09 \text{ cm}^3$  mit  $4 \times 10^{21}$  Li-Atomen. Jedes Li-Atom erfordert  $203,5 \text{ eV}$  für die Voll-Ionisation, insgesamt  $8 \times 10^{23} \text{ eV}$ . Die eingespeiste Energie beträgt nur  $20 \text{ kJ} = 1,2 \times 10^{23} \text{ eV}$ . Hier ist also keinerlei Energieüberschuß vorhanden, der das Plasma weiter aufheizen könnte. Trotzdem werden viele Neutronen beobachtet. Dies zeigt wiederum, daß außer der bereits erfolgten Aufheizung noch elektrische Felder wirksam sind. Die Beschleunigungsarbeit wird der Entladung entnommen, d. h. daß dementsprechend weniger Ionisationsprozesse stattfinden.

Ein drittes Argument liegt in den Fusionsquerschnitten, die für thermonukleare Prozesse bekannt und in einer besonderen Schrift der Oak Ridge National Laboratories [6] vorliegen. Diese, über die Maxwellverteilung gemittelten Querschnitte, bezeichnet mit  $\langle \sigma v \rangle$ , sind für die (LiD)-Reaktion über einen Bereich von 25–1000 keV angegeben. Wir befinden uns aber unterhalb des Vollionisationsbereiches von Li, also noch unterhalb des 200 eV-Bereiches. Eine Extrapolation von den ORNL-Tafeln nach kleinen Werten ergibt praktisch keine Möglichkeit für thermonukleare Reaktionen.

Wir müssen also davon ausgehen, daß die beobachteten Neutronen aus Hybrid-Reaktionen stammen: teilweise durch stromionisiertes Plasma, teilweise von elektrischen Feldern beschleunigte Ionen, die alsbald zusammenstoßen. Diese Zusammenstöße erfolgen während der Explosion, also in einem Zustand des Plasmas, der im höchsten Grade turbulent ist.

**Immer erfolgt die Emission von Neutronen in den turbulenten Zonen, wobei die Richtung der Felder sich völlig unregelmäßig verteilt.**

Hier sollte auf eine Besonderheit bei den Drahtexplosionen hingewiesen werden: Stets ist der Beginn der Explosionen durch heftige Dampfstrahlausbrüche gekennzeichnet, die senkrecht zum Draht erfolgen. Man kennt diese Dampfstrahlen seit langem und kann sie auf Glasplatten, die neben einem sehr dünnen explodierenden Draht aufgestellt sind, leicht auffangen. Diese Dampfstrahlen, die mit Überschallgeschwindigkeit ausgestoßen werden (man erinnere sich an den Knall einer durchbrennenden Sicherung), sind rings von starker Turbulenz gekennzeichnet, die sogar zu örtlicher Rückströmung des Plasmas führen kann. Damit ist in groben Zügen der Vorgang bei der Explosion eines Drahtes beschrieben. Hinzu kommt noch, daß, sobald die eigentliche Explosion beginnt, sich der Entladungskanal enorm verbreitert, und damit die Turbulenz weiter fördert.

Wir fassen die erhaltenen Resultate kurz zusammen: Explodierende (Li+LiD)-Drahte führen bei Anlegen geeigneter Spannung und Kapazität zu Kernfusionen. Die entstehenden  ${}^8\text{Be}$ -Atome zerfallen unter Aussendung von Neutronen und Abgabe von jeweils 15 MeV. Diese Energie geht zum größten Teil in die Neutronen (10 MeV) zum kleineren Teil in die  $\alpha$ -Teilchen (je 2,5 MeV) [6].

Energiebetrachtungen erlauben jedoch nicht, die weitere Aufheizung des Plasmas bei einsetzender Explosion zu berechnen. Nehmen wir z. B. einen Li-Draht von 0,3 mm Durchmesser und einer Länge von nur 30 mm. Das Volumen beträgt dann  $2,1 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ . In diesem Volumen sind  $1 \times 10^{20}$  Atome, die zur Vollionisation  $2 \times 10^{22} \text{ eV}$  brauchen. Mit der von uns benutzten Eingangskapazität von 20 kJ haben wir  $1,25 \times 10^{23} \text{ eV}$  zur Verfügung. Es sind also noch  $1 \times 10^{23} \text{ eV}$  übrig. Würde diese Energie im Plasma bleiben, so würden fast alle Atome bis zu 0,25 keV aufgeheizt. Diese Überlegung ist jedoch falsch. Der Strom bleibt nicht vollständig im ursprünglichen Plasmakanal, sondern geht zum größten Teil entlang der Peripherie in die turbulenten Zonen hinein. **Nur während dieser Zeit und nur so lange diese Zeit dauert, werden Kernprozesse beobachtet.**

Es kommt also nach Meinung des Autors vor allem darauf an, die turbulenten Zonen in den späteren Zeiten der Entladung so heftig wie nur möglich zu machen. Ein

geeigneter Vorschlag dazu wäre, zwei Drähte in kurzer Entfernung nebeneinander auszuspannen und diese gleichzeitig zu explodieren. Da die Drähte aus inhomogenem Material bestehen, ist die Stromverteilung wie auch die Spannungsverteilung entlang der Drähte verschieden. Es wird zu gegenseitiger Beeinflussung kommen, auch werden die Dampfstrahlen aus beiden Drähten (jedenfalls teilweise) die Turbulenz gegenseitig vergrößern. Eventuell käme auch die gleichzeitige Explosion mehrerer Drähte in Betracht.

Für technische Anwendungen wird man nicht von gepreßten Drähten, sondern von flüssigen Li-Strahlen ausgehen, die von entsprechend geformten Düsen austreten. Dies ist bei höherer Temperatur der Düsen leicht zu erreichen. Auch das Einbringen von LiD dürfte technisch leicht gelingen.

Es bleibt noch die wichtige Frage, wie die schnellen  $\alpha$ -Strahlen in den Turbulenzen ihre Energie abgeben können. Das Problem entspricht der Streuung von  $\alpha$ -Strahlen, die seinerzeit von Rutherford untersucht wurde. Der Grundgedanke dieser Arbeiten ist der, daß die  $\alpha$ -Teilchen so nahe an die Li-Kerne herankommen, bis ihre kinetische Energie der potentiellen Energie der abstoßenden Kernladungen entspricht. Nennt man den Stoßparameter  $p$  und den Ablenkungswinkel  $\vartheta$ , so ist

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{2 Ze^2}{p \cdot mv} \text{ und für } \vartheta = 45^\circ \text{ ist } p = \frac{Ze^2}{\frac{m}{2} v^2}$$

$p^2 \cdot \pi$  ist dann der Stoßquerschnitt  $Q$ . Dieser ist, wie man bemerkt, umgekehrt proportional der kinetischen Energie der  $\alpha$ -Teilchen. Mit  $Z = 3$

$$\pi p^2 = \pi \left( \frac{Ze^2}{E_{\text{kin}}} \right)^2 = \pi \left( \frac{6,9 \cdot 10^{-19}}{E_{\text{kin}}} \right)^2 \text{ ergibt sich in Zahlen:}$$

$E_{\text{kin}} = 10 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ erg}$	$Q = 5,8 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$
$E_{\text{kin}} = 1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ erg}$	$Q = 5,8 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$
$E_{\text{kin}} = 0,1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-7} \text{ erg}$	$Q = 5,8 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$

Die freie Weglänge der  $\alpha$ -Teilchen ist

$$\lambda_{\alpha, \text{Li}} = \frac{1}{n_{\text{Li}} \cdot Q}.$$

Aus den angegebenen Werten erkennt man, daß die freie Weglänge der  $\alpha$ -Teilchen immer noch 34 cm beträgt, selbst wenn man die Dichte von festem Li mit  $n_{\text{Li}} = 5 \times 10^{22}$  Atomen/cm<sup>3</sup> und als Geschwindigkeit der  $\alpha$ -Teilchen nur 1 MeV einsetzt. Die  $\alpha$ -Teilchen können also keine Folgereaktionen auslösen. Sie verlassen die Entladung und können in einem die Explosion umgebenden Mantel (z. B. aus wassergekühltem Edelstahl) direkt aufgefangen und zur Erwärmung (Verdampfung des Wassers) benutzt werden.

In der praktischen Anwendung kann man auf die Benutzung von Deuterium völlig verzichten. Sie diene allein zum Nachweis der gelungenen Kernreaktionen. Nimmt



man LiH anstelle von LiD, so treten keine Neutronen mehr auf, eine Schädigung der Umwelt durch Neutronen gibt es ebenso wenig wie durch Radioaktivität. Stattdessen wird die volle Energie der Kernspaltung von 15 MeV auf die beiden  $\alpha$ -Teilchen übertragen. Für Kernreaktionen ist dann die freie Weglänge viele Meter. In der umgebenden Atmosphäre haben die  $\alpha$ -Teilchen aber – wie bekannt – eine Reichweite von nur einigen Zentimetern, da sie das umgebende Gas ionisieren. Je niedriger der umgebende Druck, umso größer die Reichweite. Bei niedrigem Druck werden aber die Turbulenzen geringer. Es muß also experimentell noch ein Optimum gefunden werden, um bei genügend hoher Turbulenz in der unmittelbaren Umgebung des Drahtes noch viel Energie der  $\alpha$ -Teilchen zur Erwärmung des Gehäuses zur Verfügung zu haben. Bei einer periodisch arbeitenden Maschine – und nur eine solche kommt hier in Betracht – wird eine genügende Aufheizung des Gehäuses aber vermutlich leicht erreicht.

Ein gelegentlich geäußelter Einwand gegen die hier konzipierte Fusionsmaschine besteht darin, daß die Kernfusionsprozesse nur so lange dauern, wie die Entladung anhält und nicht länger. Das ist richtig. Es hindert aber nichts (Überlegungen dazu wurden bereits in Literatur [5] angestellt), die Entladungen sehr häufig in der Explosionskammer aufeinander folgen zu lassen. Wenn nur in der Einzelexplosion Energie gewonnen wird, so wird dies auch im technisch interessanten Maßstabe gelingen. Im Gegenteil empfindet es der Autor als vorteilhaft, zunächst kleinere, billigere Einheiten zu bauen. Eine Ausweitung auf große Energieerzeugungseinheiten ist eine spätere Frage der Technik. Es läßt sich also sagen, daß bei den hier beschriebenen Versuchen die nicht thermonukleare Fusion geglückt ist. Man wird auch genügend Fusionsprozesse bei geschickter Anordnung erhalten können. Das Problem der Energieauskopplung bedarf noch einiger Experimente, läßt sich aber aller Wahrscheinlichkeit nach ebenfalls lösen.

Katzenstein und Sydor haben 1962 eine Arbeit veröffentlicht [7], bei der ebenfalls (Li + LiD)-Drähte explodiert wurden. Die Autoren benutzten – wie das in den sechziger Jahren üblich war – schnelle Entladungen mit einer Schwingungsdauer von  $T = 2,7 \mu\text{sec}$ , um für kurze Zeit genügend hohe Temperaturen für thermonukleare (D, D)-Kernreaktionen zu erhalten. Die Li-Menge im Draht betrug  $1,4 \times 10^{18}$  Atome, die zur Vollionisation  $2,8 \times 10^{20}$  eV brauchen. Eingespeist wurden  $5,5 \times 10^{22}$  eV, d. h. etwa das zweihundertfache der zur Vollionisation benötigten Energie. Die Ausbeute betrug  $10^6$  Neutronen, gemessen ohne Zeitauflösung durch Aktivierung eines Ag-Blechtes. Die Autoren rechnen mit thermischem Gleichgewicht von  $10^{-6}$  sec Dauer und gelangen zu Temperaturen von 300 eV. Der thermonukleare Fusionsquerschnitt ist nach Extrapolation der ORNL-Tabellen [6] jedoch für die (D, T)-Fusion  $\langle \sigma v \rangle$  kleiner als  $10^{-23} \text{ cm}^3/\text{sec}$  und für die (D, D)-Fusion noch einige Zehnerpotenzen kleiner.

Interessant an dieser Arbeit ist, daß sehr hohe Energie aufgewendet wurde, um kurzzeitig hohe Temperaturen zu erreichen. Diese Methode ist ganz offensichtlich für Fusionszwecke nicht geeignet. Damit entfallen auch alle früheren Versuche, mit deuterierten Drähten aus anderen Metallen Fusion zu erreichen.

Im Gegensatz zu allen früheren Arbeiten mit explodierenden Drähten kommt es nicht darauf an, durch viele Energie möglichst schnell auf hohe Temperaturen zu kommen, sondern **bei mäßigen Temperaturen für**

**möglichst lange Zeit zusätzlich elektrische Felder**, d. h. hybride Reaktionen zu verwenden.

Zum Schluß sei noch die in unseren Versuchen gemessene Anzahl der Neutronen angegeben. Es sind etwa  $10^4$ . Das ist wenig. Man muß aber bedenken, daß die Versuche nicht zum Ziel hatten, große Mengen von Neutronen zu erhalten, sondern nur einen neuen Weg anzugeben, wie man Kernreaktionen erhalten kann, die nicht therm nuklearen Ursprungs sind, sondern hybriden Prozessen entsprechen. Diese Prozesse vollziehen sich ohne jede Benutzung radioaktiver Stoffe und ohne radioaktive Rückstände.

Ich möchte den Herren Kollegen Kistemaker in Amsterdam, Bagge und dem leider plötzlich verstorbenen Kollegen Johannes Richter in Kiel für wertvolle Diskussionen danken.

### Literatur

- [1] J. A. ANDERSON: Astrophys. Journ. **51**, 37, 1920.
- [2] Die Literatur der sechziger Jahre ist im wesentlichen in den vier Bänden, herausgegeben von W. G. CHASE und H. K. MOORE: „Exploding Wires“, zusammengestellt. Plenum Press 1959, 1961, 1964, 1967.
- [3] S. J. STEPHANAKIS, L. S. LEVINE, D. MOSHER, I. M. VITKOVITSKY und F. YOUNG: Phys. Rev. Letters **29**, 568, 1972.
- [4] U. FISCHER, H. JÄGER und W. LOCHTE-HOLTGREVEN: Phys. Letter 44B, 161, 1973.
- [5] H. JÄGER und W. LOCHTE-HOLTGREVEN: Zschr. f. Phys. **198**, 372, 1967.
- [6] J. R. McNALLY, K. E. ROTHE und R. D. SHARP: ORNL/TM-6914.
- [7] J. KATZENSTEIN und M. SYDOR: Journ. of appl. Phys. **33**, 718, 1962,